

유전알고리즘을 이용한 차동신호선의 등가회로 모델링

(A Modeling for Equivalent Circuit of Bent Differential Structures using Genetic Algorithm)

변용기* · 박종강 · 김종태**

(Yong-Ki Byun · Jong-Kang Park · Jong-Tae Kim)

요 약

회로 전송선 배선 시 신호선은 직선의 형태와 방향을 바꾸기 위한 구부러지는 형태를 가진다. 차동 신호선의 정확한 등가회로는 이러한 전송선 구조의 시·공간 영역에서의 신호적 특성과 인접 신호선들 간의 영향을 평가할 수 있게 해준다. 이를 위해 기존의 몇몇 CAD Tool들이 등가 회로 모델과 그 파라미터 값들을 추출 해주기도 하지만, 이는 큰 연산량과 시간을 요구한다. 본 논문에서는 구부러진 차동 신호선의 등가회로를 모델링하기 위해 기본적 모델인 RLC-모델의 파라미터 값을 유전 알고리즘을 이용하여 추출하는 방법을 제시한다. 본 방법에 의해 더욱 빠르게 물리적 구조를 갖는 차동 신호선의 등가회로를 모델링 할 수 있다.

Abstract

Routing signal lines in PCB, line shapes would be straight or bent. time-domain and frequency-domain evaluation of the signal property and interference are archived by precise Modeling of differential signal line. Some of CAD tools can extract equivalent circuit model parameters. but it takes a long time and heavy loads. This paper introduces a basic RLC equivalent circuit model parameter extraction technique for bent differential structures using genetic algorithm. by this technique, we can model equivalent circuit of bent differential structures more faster.

Key Words : differential structure, genetic algorithm, equivalent circuit

1. 서 론

시스템들이 점차 경박단소(輕薄短小)화되어 감에 따라 시스템에서 요구하는 전력/신호의 크기는 점차 작아지는 추세이다. 하지만 이는 신호의 전압 여유(Voltage margin)를 작게 하여, 시스템이 외부 잡음에 대해 안정적으로 동작하는 것을 방해하기도 한다. 사용 주파수 영역이 수 [GHz]까지 올라감에 따라 전

* 주저자 : 성균관대학교 전자전기공학부
 ** 교신저자 : 성균관대학교 전자전기공학부 교수
 Tel : 031-290-7130, Fax : 031-299-4613
 E-mail : jtkim@skku.ac.kr
 접수일자 : 2006년 5월 23일
 1차심사 : 2006년 5월 26일
 심사완료 : 2006년 6월 8일

유전알고리즘을 이용한 차동신호선의 등가회로 모델링

송선의 구조적인 형태는 신호의 안정적인 전송에 매우 중요한 요인으로 작용한다. 이를 개선하기 위해 고속 PCB 등에서는 LVDS(low-voltage differential signaling)나 GLVDS(ground low-voltage differential signaling)등의 차동 신호(differential signaling) 전송방법이 사용되기도 한다. 이러한 방법들은 적은 EMI(electro-magnetic interference) 방사와 공통모드 잡음 등에 대해서 안정적으로 신호를 주고받을 수 있게 해준다.

그림 1은 상기와 같은 차동신호 전송방식 중 기본적인 차동 신호 전송방식과 차동 신호선을 엮어 노이즈를 개선한 트위스트 차동 신호선[1]의 예를 보여주고 있다. 이와 같은 신호선 구조를 등가 회로로 표현 할 수 있다면, 회로의 물리적 구조(차동신호 페어간 거리, 차동 신호선 간 거리, 도선 두께, 참조평면과의 거리 등)에 따른 시간, 주파수 영역에서의 특성과 신호 무결성을 평가/예측할 수 있을 것이다. 물리적 구조를 정확하게 등가회로로 모델링하기 위해서, 모델링 하고자 하는 구조의 S-파라미터에 우리가 추출한 등가회로의 S-파라미터 값을 일치 시켜 주는 방법이 있다. S-파라미터(scattering parameter)는 외부 입력에 대한 회로 응답의 특성을 보여주는 값으로, 등가회로 추출 후 모델 타당성 검증에도 널리 쓰이는 방법이다.

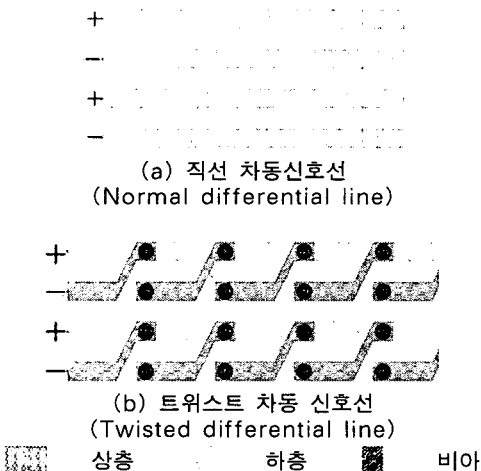


그림 1. 차동 신호선의 구조
Fig. 1. Differential line structures

본 논문에서는 굵은 모양의 차동 신호선 등가회로를 위해 S-파라미터 일치 방법(fitting)을 사용하며, 이를 구현하기 위해 유전 알고리즘을 사용한다. 등가 회로의 모델은 R(저항), L(인덕터), C(콘덴서)의 파라미터로 이루어져 있는 하나의 집합체(lump)로 구성된다. 신호선의 등가 회로 표현은 몇몇 3D 전자기 해석 툴에 의해서도 가능하다. 하지만 아직까지는 많은 시간을 요구하므로, 본 논문에서는 유전 알고리즘에 국부 최적화(local optimize)를 적용하여 굵은 차동 신호선에 대한 등가회로를 빠르게 얻을 수 있는 방법을 소개한다.

2. 등가 회로 추출 절차

고속 신호 전송에 있어서 차동신호선의 구조는 신호의 응답 특성에 매우 큰 영향을 미친다. 구조적 특성에는 신호선의 두께, 접지와와의 거리, 차동 신호선 내 페어간 거리, 차동 신호선 간 거리 등 여러 가지 요소가 포함된다. 이를 위한 등가 회로 추출 절차는 그림 2와 같다.

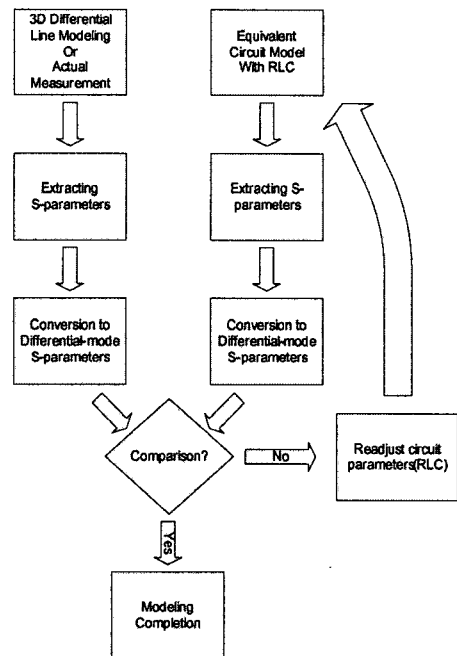


그림 2. 차동 신호선의 등가회로 추출절차
Fig. 2. Procedure of equivalent circuit extraction

위 절차는 기존 절차[2]를 참조하여 만들어 졌다. 기존의 경우 실험은 단일 전송선에 대한 단일 포트 등가 회로 모델에 대한 절차이므로, 본 실험에서는 이를 변형하여, 차동 모드에 대한 이중 포트 모델로 변형하여 실험을 진행하였다. 차동 모드에 대한 S-파라미터는 혼합모드에서 S-파라미터 연산[3]에 의해 쉽게 구할 수 있다. 유전 알고리즘에 의해 추출된 S-파라미터와 실제 측정되거나, 3D 툴에 의해 추출된 S-파라미터의 값이 원하는 수준까지 일치된다면 실험은 끝나게 된다. 본 논문에서는 이를 위해 회로의 파라미터를 위한 RLC-Generator와 주어진 R, L, C의 등가 회로를 위한 Schematic-Generator를 제작하였다. 여기에 만들어진 등가회로 모델의 S-파라미터를 추출하기 위해 HP사의 ADS(Advanced Design System) command line simulator 툴(HPEESOF-SIM)을 사용하였다. S-파라미터는 리액턴스 요소를 가지고 있으므로, 절차 중 비교 단계에서는 추출된 값의 실수부 및 허수부에 대한 값을 모두 고려할 수 있어야 한다[4].

3. 차동 신호선 등가 회로 모델

차동 신호선의 일반적인 등가 모델은 그림 3과 같이 표현된다. 단일 신호선의 신호 복귀 경로가 접지(ground)인 것과는 달리 차동 신호선의 복귀 경로는 차동선 페어 내 다른 선이 되므로, 차동 신호선의 등가 모델은 신호선이 접지에 연결 되어 있지 않다.

본 실험에서는 등가회로 모델의 R, L, C 값을 설정하기 위해 유전 알고리즘을 적용한다. 등가회로 파라미터의 유전 알고리즘 적용은 다음 장에서 구체적으로 설명한다.

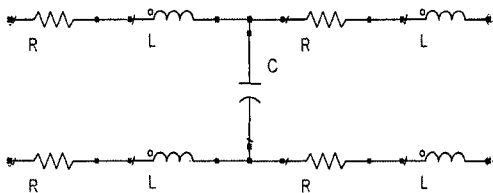
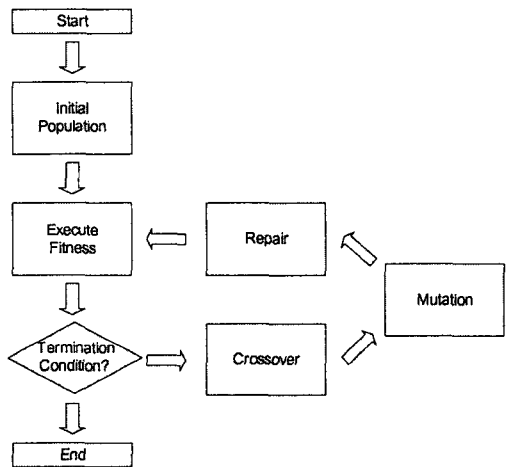


그림 3. 차동 신호선의 등가회로
Fig. 3. Differential line equivalent circuit

4. 등가회로의 유전 알고리즘 적용

본 절에서는 유전 알고리즘을 굽은 차동 신호선에 대해 적용하고, 그에 따른 차동 신호선의 등가 회로를 추출하기 위하여, 관련 개념을 수식화 하고, 유전 알고리즘의 진화 절차를 설명하다.

4.1 유전 알고리즘



```

procedure SGA()
  initialize(Population);
  evaluate(Population);
  while not (terminal condition satisfied) do
    MutationPool = crossover(Population);
    MatingPool = mutation(MutationPool);
    Population = repair(MatingPool);
    evaluate(Population);
  end while
end procedure
  
```

그림 4. 유전 알고리즘의 흐름도 및 Pseudo-code
Fig. 4. GA(genetic algorithm) flow and Pseudo-code

그림 4는 단순 유전알고리즘의 흐름도 및 Pseudo-code를 나타낸다.

유전 알고리즘이 다른 탐색이나 최적화 방법과 다른 점은 다음과 같다[5-6].

1. 파라미터를 코딩(유전적으로 표현)한 것을 직접이용
2. 점(point)이 아닌 다점(multi points: 군(popu-

lation)) 탐색 방법

3. 탐색에 비용 정보(fitness function)를 이용하며, blind search를 함(미분 값이나 다른 부가적인 지식을 요구하지 않는다).
4. 결정론적인 규칙이 없고 확률적 연산자를 사용하여 수행

유전 알고리즘은 이와 같은 특징으로 인해 다른 탐색 또는 최적화 방법 중 하나인 계산에 의존한 방법(ex. hill-climbing)에 비하여 전역적 해를 구할 가능성이 높으며 다른 여러 탐색 방법에 비하여 효율적인 특성을 갖는다.

4.2 목적함수, 수식화, 유전적 표현

4.2.1 목적함수 및 수식화

S-파라미터는 크기/위상으로 표현 되거나, 실수부와 허수부를 갖는 복소수로 표현 될 수 있다. 우리가 관심을 갖는 주파수 대역이 최소 f_m 에서 최대 f_M 이고, N개의 포트를 갖는 회로라면, 최소 제곱 에러(Least Square Error)를 통해 최적 해를 찾기 위한 목적함수 OF(objective function)는 다음과 같다.

$$OF = \sum_{f_s} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |S_{ij}^{Measure} - S_{ij}^{GA}| \quad (1)$$

$$R_m \leq R \leq R_M, L_m \leq L \leq L_M, C_m \leq C \leq C_M \quad (2)$$

여기서 $S_{ij}^{Measure}$ 는 j포트의 입력에 대한 i포트에서의 응답을 실제 측정된 S-파라미터 값이며, S_{ij}^{GA} 는 등가 회로에서 유전 알고리즘에 의해 추출된 j포트에 대한 i포트의 응답 S-파라미터 값을 의미한다. 유전 알고리즘의 적용을 위해 R, L, C 값이 염색체(chromosome)로 설정되며, 본 실험에서는 이를 단순화하기 위하여, 수식 2와 같이 각 염색체의 범위를 제한하고, 이 범위 밖의 값에 대해서는 구현이 불가능한 것으로 간주하였다.

그림 5는 유전 알고리즘을 이용하여, 등가회로를 추출하는 절차를 나타내고 있다. 초기 개체군(population)은 수식 2의 범위 내에서 랜덤하게 선택된다. 후에 각 염색체 의해 등가회로가 구성되고,

HPFEESOF-SIM을 통해 S-파라미터를 추출한다. 이는 수식 1을 통하여 우리가 모델링 하고자 하는 값과 비교된다. 유전 알고리즘은 교배(crossover)와 돌연변이(mutation)를 통해 다음 세대의 개체군을 형성, 진화를 한다. 수정(repair) 함수는 개체군 중에서 수식 2를 만족 하지 못하는 해인 경우, 해가 영역 안쪽으로 올 수 있도록 염색체를 조정하는 함수이다. 본 실험에서는 단순 유전 알고리즘에 지역적 최적화 방식(Local optimum)인 Hill climbing 방식을 추가 하였다. 이와 같은 하이브리드 방식을 통하여, 최적해에 더욱 빨리 접근할 수 있다.

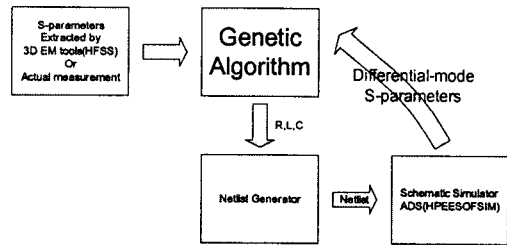


그림 5. 유전알고리즘을 적용한 등가회로 추출
Fig. 5. Equivalent circuit extraction using GA

4.2.2 유전적 표현

유전 연산자(genetic operator)에 대한 구체적 정의는 다음과 같다.

교배(crossover) - 교배는 개체군중 P_{∞} 의 확률로 2개의 개체를 선택, 2개의 개체 간에 염색체를 부분적으로 서로 바꿈으로써 새로운 개체를 생성하는 것이다. 교배에 의해 진화된 개체/자손(offspring)은 다음과 같다.

$$x_s = rx_{p1} + (1-r)x_{p2} \quad (3)$$

위에서 x_s, x_{p1}, x_{p2} 는 각각 자손과 두 부모세대의 R, L, C에 대한 염색체를 의미하며, r은 0에서 1의 범위를 갖은 임의의 값이다.

돌연변이(mutation) - 개체에 근접한 새로운 개체를 생성하는 국소적인 랜덤 탐색의 일종으로, 개체군중 P_{MT} 의 확률로 2개의 개체를 선택, 개체의 각 유전자에 대하여 일정한 돌연변이 확률을 적용하여 대립 유전자의 값으로 바꾸는 것으로 다음과 같은

식으로 구해진다.

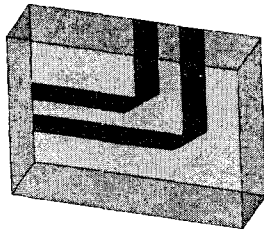
$$x_s' = x_s + r(x^M - x_s)(1 - t/T)^k \quad (4)$$

여기서 r 은 0과 1사이의 임의의 수가 되며, T 는 최대 진화 횟수, k 는 비균일상수(non-uniformity)를 의미한다.

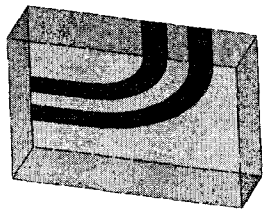
Hill climbing - 지역 최적화는 염색체의 증가 혹은 감소를 미리 정해진 크기로 결정한다. 만일, 더 이상의 진전이 없다면 증가에서 감소로, 혹은 감소에서 증가로 진행 방향을 바꾼다.

교배와 hill climbing은 근접 최적해에 수렴하는 특성을 보이며, 자손이 수렴 값에 도달했을 경우 돌연변이는 이를 뛰어 넘어 개선된 결과를 얻을 수 있도록 한다.

5. 실험 결과



a) 모서리 깎여 굽은 차동 신호선 (Angle band differential line)



(b) 완만히 굽은 차동 신호선 (Curved band differential line)

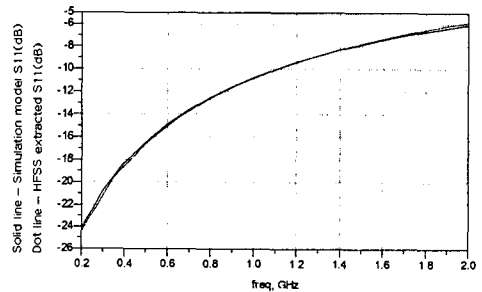
그림 6. 실험을 위한 차동신호선 구조
Fig. 6. Differential line structures for experiment

본 논문에서는 그림 6과 같이 모서리가 깎여 굽은 차동 신호선과 완만하게 굽은 차동 신호선에 대해서

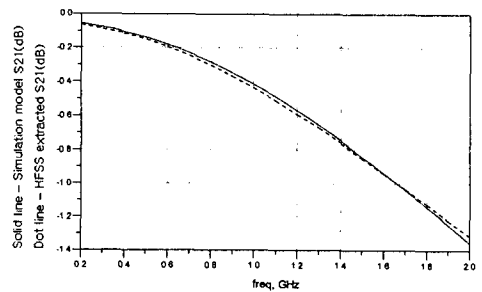
실험하였다. 각 실험은 50mil-thickness FR4 기판을 적용하였으며, 유전 알고리즘을 위한 상수값 및 범위는 다음과 같이 적용하였다.

$$T=30, P=120, P_{CO}=0.3, P_{MT}=0.05, R^n=0.01[\Omega], R^M=100[\Omega], L^n=0.01[nH], L^M=100[nH], C^n=1500[fF], C^M=0.0[fF], k=2.0$$

실험간 차동선내 거리, 신호선 폭에 변화를 주었으며, 여기서 추출된 S11부터 S22까지 차동 모드 S-파라미터를 0.2[GHz]부터 2.0[GHz]까지 0.1[GHz] 단위로 평가하여, 최소 제곱 오차 값을 갖는 최종 등가 회로를 추출할 수 있었다.



(a) 모서리 깎여 굽은 차동 신호선 S11-parameter (Angle band differential line S11-parameter)



(b) 모서리 깎여 굽은 차동 신호선 S21-parameter (Curved band differential line S21-parameter)

그림 7. 차동 신호선의 S-parameter 일치
Fig. 7. Experiment result

그림 7은 신호선 길이 10[mm], 신호선 폭 1[mm], 차동선내 거리를 1[mm]로 실험한 결과를 나타내고 있다. 비록 1개의 집합체(lump)에 의한 등가회로 모델링에서 추출된 S-파라미터이지만, 추출된 곡선은 3D 전자기 해석 틀에 의해 추출된 S-파라미터 곡선에 매우 근접하는 것을 확인할 수 있다. 차후 등가회

로 추출에 있어서 복잡적 집합체(lump)를 적용한 모델이 적용된다면, 보다 넓은 주파수 영역에서 더욱 근접한 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 테이블 1에서는 상기와 같은 조건에서 차동 신호선 폭 및 차동 신호선 내 거리를 각각 달리 하여 실험된 결과를 나열하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 굵은 차동 신호선에 대한 등가회로 추출하기 위하여, 유전 알고리즘을 적용한 방법을 이용하였다. 비록 본 논문에서 사용된 회로 모델이 상호 인덕턴스 성분을 포함하고 있지는 않았지만, 이를 통하여 추출된 등가회로의 S-파라미터는 실제 계측되거나 3D 전자기 해석 틀에 의해 추출된 S-파라미터와 매우 흡사한 결과를 보였다. 차후 물리적 구조에 대한 더욱 정확한 모델이 적용된다면, 본 연구에 의한 방식 역시 더욱 근접한 결과를 보여 줄 수 있을 것이다. 또한 타 구조에 대한 모델 역시 본 논문에서와 같이 유전 알고리즘을 통하여 등가회로를 추출할 수 있을 것이다.

표 1. 각 구조별 추출된 등가회로 파라미터
(a) 모서리 깎여 굵은 차동 신호선
(b) 완만히 굵은 차동 신호선

Table 1. Extracted equivalent circuit parameter
(a) Angle band differential line
(b) Curved band differential line

Shape	l(mm)	w(mm)	s(mm)	R(Ω)	L(nH)	C(fF)
(a)	10.0	1.0	1.0	0.187	1.39	53.6
	10.0	0.5	1.0	0.308	1.93	133.2
	10.0	1.0	0.5	0.134	1.15	97.8
(b)	10.0	1.0	1.0	0.094	1.3	71.3
	10.0	0.5	1.0	0.306	1.91	124.3
	10.0	1.0	0.5	0.173	1.3	150.9

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RT104-03-04) 지원으로 수행되었음.

References

- [1] Dong Gun Kam, Seungyoung Ahn, Seungyong Baek, Bongcheol Park, Myunghee Sung and Joungho Kim, "A novel twisted differential line for high-speed on-chip interconnections with reduced crosstalk," Electronics Packaging Technology Conference, 2002. 4th, Page(s):180 - 183, 10-12 Dec. 2002.
- [2] D. G. Kam, H. Lee and J. Kim, "Twisted differential line structure on high-speed printed circuit boards to reduce crosstalk and radiated emission," IEEE Trans. on Advanced Packaging, Vol. 27, pp.590-596, 2004.
- [3] D. Bockelman and W. Eisenstadt, "Combined differential and common mode scattering parameters : theory and simulation," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 43, pp. 1530 - 1539, 1995.
- [4] P. L. Wemer, R. Mittra and D. H. Wemer, "Extraction of equivalent circuits for microstrip components and discontinuities using the genetic algorithm," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol.8, pp.333-335, 1998.
- [5] Hounsell, B.L., Arslan, T. "A novel genetic algorithm for the automated design of performance driven digital circuits," Evolutionary Computation, 2000. Proceedings of the 2000 Congress on, pp.601-608 vol.1, 16-19 July 2000.
- [6] M. Gen and R. Cheng, "Genetic Algorithms and Engineering Optimization," John Wiley & Sons, Inc., 2000.

◇ 저자소개 ◇

변용기 (卞溶基)

1979년 8월 27일생. 2002년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 졸업. 2005년~현재 성균관대학교 전자전기공학과 석사과정 재학.

박종강 (朴鍾剛)

1978년 6월 23일생. 2001년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업. 2003년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 졸업(석사). 2003년~현재 성균관대학교 전자전기공학과 박사과정 재학.

김중태 (金鍾兌)

1959년 11월 11일생. 1982년 성균관대학교 전자공학과 졸업. 1987년 University Of California at Irvine, 전기 및 컴퓨터공학과 대학원 졸업(석사). 1992년 University Of California at Irvine 전기 및 컴퓨터공학과 대학원 졸업(박사). 1991~1993년 The Aerospace 연구원. 1993~1995년 전북대학교 컴퓨터공학과 교수. 1995년~현재 성균관대학교 정보통신공학부 교수.